
Appel A Projets III : formulaire de candidature

Il n'est pas indispensable d'utiliser le présent formulaire pour soumettre un projet. Toutefois pour faciliter le travail des rapporteurs, merci de respecter l'architecture générale de ce document pour votre réponse.

Nom du correspondant : MAURY Cédric

Nom du projet : Métamatériaux aéro-acoustiques et aérodynamiques pour la réduction du bruit basse fréquence sous écoulements dans les secteurs des transports et de l'énergie.

Résumé du projet (5 lignes en anglais) : This project associates the complementary expertise of LMA (aero-acoustics, low frequency noise reduction), IRPHE (flow modelling and characterization) and CSIC (micro-perforated metamaterials) to investigate aero-acoustic solutions for aeronautics and wind turbine sectors: the development of slow-sound metamaterials with acoustically neutral interfaces in order to achieve both flow-induced noise attenuation and low drag performance under sheared industrial flows.

Volet(s) complémentaires demandé(s) : Collaboration internationale Pédagogie

Contenu scientifique (3 pages maxi)

Contexte scientifique

Les sources de bruit basses fréquences sont de plus en plus présentes dans les écoulements guidés, notamment dans le domaine aéronautique où l'évolution des architectures moteurs est pilotée par la réduction de la consommation énergétique. L'usage de turboréacteurs à très forts taux de dilution implique une diminution de la vitesse de rotation des ailettes compresseur et donc un décalage typiquement de 1500 Hz à 500 Hz de la limite basse fréquence des performances atténuation du bruit de soufflante [1]. A cela s'ajoute une diminution de la surface allouée au traitement acoustique afin de minimiser la traînée aérodynamique des nacelles. Afin de satisfaire les objectifs fixés par ACARE [2] d'une réduction de 65% par rapport à 2000 du niveau de bruit perçu au voisinage des aéroports d'ici 2050, le développement de traitements acoustiques émergents en rupture avec l'existant (perforés-nid d'abeille) est préconisé pour des performances à la fois acoustique (basses fréquences – large bande) et aérodynamique (faible traînée) augmentées [1]. Cette double problématique est également présente dans les domaines des transports automobiles pour l'optimisation aéro-acoustique des silencieux d'échappement [3] ainsi que pour la réduction du bruit basses fréquences des systèmes de conditionnement d'air pour le bâtiment sans introduire de pertes de charges aérauliques supplémentaires [4].

Ce projet IMI adresse deux objectifs, acoustiques et aérodynamiques, souvent difficilement conciliables, par le développement de métamatériaux aéro-acoustiques à faible traînée aérodynamique pour l'atténuation large-bande et basses fréquences d'ondes acoustiques se propageant en conduit sous écoulement subsonique. De nombreuses études ont été consacrées aux propriétés acoustiques des métamatériaux [5,6] alors que, comparativement, peu d'études adressent leur comportement sous écoulement [7]. Les métamatériaux ont des propriétés effectives non conventionnelles résultant de leur architecture cellulaire anisotrope. Ils permettent une manipulation des ondes, par exemple à des fins de furtivité acoustique dans un fluide au repos [8], étendue au cas d'un écoulement turbulent [9]. L'introduction périodique d'inclusions résonantes induit des propriétés effectives négatives de masse et/ou de compressibilité conduisant à l'apparition de bandes interdites stoppant la transmission acoustique [10,11]. Cela a été vérifié *via* le formalisme de Bloch pour un conduit traversé par un écoulement uniforme dont les parois sont munies d'une distribution périodique de résonateurs de Helmholtz à col micro-perforé [12]. La largeur de ces bandes a pu être augmentée en basse fréquences en faisant coïncider les résonances d'inclusions avec les résonances de Bragg inter-résonateurs et en contrôlant les pertes visco-thermiques à l'aide de micro-perforés, mais l'étendue axiale du traitement restait importante. D'autres types de métamatériaux basses fréquences ultra-ouverts en écoulement ont été développés, basés sur les interférences destructives entre l'onde se propageant dans un conduit et celle ralentie par un chemin de propagation hélicoidal au sein du métamatériau [13]. Cela conduit à une atténuation acoustique importante, cependant sur une bande étroite de fréquences, accompagnée de décollements tourbillonnaires liés à l'obstruction partielle de l'écoulement par le métamatériau. Les métamatériaux développés dans ce projet IMI seront à gradients de propriétés axiales et/ou radiales afin de maximiser l'atténuation acoustique sur une large bande dans le domaine des basses fréquences, mais aussi interfacés de manière adéquate avec l'écoulement pour induire un faible coefficient de frottement. L'objectif acoustique résultera du ralentissement progressif des vitesses de groupe et de phase des ondes acoustiques se propageant dans le conduit, qui pourront être dissipées efficacement au sein de canaux labyrinthiques.

Cependant, la présence d'un écoulement au contact direct de la surface poreuse d'un matériau génère de la traînée et des instabilités aéro-acoustiques [14] (type Kelvin-Helmholtz dues aux modes de surface hydrodynamiques ou aux modes de Bloch si périodicité des pores) qui transfèrent l'énergie de l'écoulement moyen vers des perturbations acoustiques (sifflements). L'utilisation de toiles métalliques ou de feuilles Kevlar protectrices supprime les instabilités aéro-acoustiques et diminuent la traînée. Cependant, ces matériaux ne sont pas acoustiquement neutres : ils ajoutent des effets résistifs (dissipatifs) et inertiels qui dégradent (de près de 40% avec le Kevlar) l'atténuation acoustique générée sans écoulement sur les bandes interdites [15]. Un point critique adressé dans ce projet est donc la recherche d'interfaces métamatériaux-écoulement qui soient acoustiquement neutres pour ne pas brider les performances du métamatériau, tout en générant une faible traînée. Des interfaces micro-capillaires

purement résistives, à surface lisse et constituées d'une grande densité de canaux micro-métriques (20-50 μm), seraient très appropriées car leur dissipation large-bande pilotée par la résistivité ne dépend pas de la fréquence et est calibrée par le diamètre des micro-canaux [16]. Des mesures CSIC-LMA ont montré que les IMC absorbent plus de 80% de l'énergie acoustique sur 9 octaves.

Ce projet s'appuie sur les compétences complémentaires de trois équipes : l'équipe Sons du LMA dont la thématique « Réduction des Basses Fréquences » est un des axes forts de recherche appuyé par le développement de modèles numériques et des moyens d'essai innovants, l'équipe Ecoulements Industriels d'IRPHE dont l'expérience sur la modélisation et la caractérisation en souffleries d'interactions complexes écoulement-structures est essentielle au projet et la collaboration internationale avec l'équipe Acoustique Environnementale du Laboratoire ITEFI (CSIC) de Madrid qui apportera son expertise acquise travers le pilotage de deux projets nationaux sur la caractérisation et l'optimisation de matériaux micro-perforés sous excitations acoustique et aérodynamique.

Programme

Le plan de travail s'articulera autour de trois tâches associant modélisations théoriques, numériques et caractérisations expérimentales des propriétés aéro-acoustiques de métamatériaux sous écoulement.

Tâche 1 : Modélisation aéro-acoustique de métamatériaux à gradients de propriété sous écoulement.

1.1 Modélisation par matrices de transfert des performances d'atténuation acoustique en conduit sans écoulement de métamatériaux constitués d'un gradient axial et/ou radial de cellules labyrinthiques enroulées (dénommé MG-COIL) pour assurer respectivement des performances d'atténuation large-bande et basses fréquences sur la plage 500 Hz – 1500 Hz. Prise en compte de variations quadratiques de la topologie des cellules, basées sur le concept de trous noirs acoustiques [17], pour réduire progressivement les vitesses de phase et de groupe des ondes acoustiques dans la section traitée afin qu'elles soient piégées et efficacement atténuées par dissipation visco-thermique au sein des cellules. Validations numériques par éléments finis sur Comsol Thermoviscous Acoustics. [T0 → T0+6]

1.2 Modélisation par décomposition modale (acoustique et hydrodynamique) de l'atténuation acoustique du traitement MG-COIL en conduit en contact direct avec un écoulement cisailé de profil paramétré : influence d'une propagation acoustique suivant ou contre l'écoulement. Analyse aux valeurs propres des instabilités hydrodynamiques de surface au voisinage des résonances acoustiques des cellules : influence de la géométrie des ouvertures pour réduire ces instabilités sans détériorer l'atténuation. Validation numérique sous Comsol Aeroacoustics - Linearized Navier-Stokes et par méthode Lattice Boltzmann 2D/3D pour des écoulements de nombre de Mach inférieur à 0.3. [T0+3 → T0+9]

1.3 Modélisation par méthode modale de l'effet d'une interface micro-capillaire (IMC) entre un MG-COIL et un écoulement cisailé sur l'atténuation acoustique et la suppression des instabilités aéro-acoustiques. Développement d'une IMC acoustiquement neutre à très faible résistivité : les propriétés acoustiques de MG-COIL ne devraient pas être ré-optimisées lorsque protégé de l'écoulement par une IMC. Validation numérique sous Comsol Aeroacoustics - Linearized Navier-Stokes et Lattice Boltzmann 2D/3D. Calcul du coefficient de frottement de l'IMC. [T0+6 → T0+12]

Tâche 2 : Mesures des propriétés acoustiques et aérodynamiques de métamatériaux sous écoulement.

2.1 Fabrication additive de MG-COIL et mesures de ses propriétés acoustiques radiales (absorption, transmission, masses et compressibilité effectives, paramètres de transports visco-thermiques d'un modèle de poreux à structure rigide) sur tube à impédance à 3 microphones sans écoulement (Banc CSIC). Mesure des propriétés acoustiques axiales (atténuation, dissipation) sur tube à transmission acoustique multi-sources (Banc LMA). Mesures champ proche des propriétés acoustiques des surfaces MG-COIL/IMC à l'aide de sondes pression-vitesses 3D (CSIC). Comparaison et affinage des modèles acoustiques 1.1. [T0+3 → T0+9].

2.2 Mesures des propriétés aéro-acoustiques de MG-COIL/IMC sous écoulement cisailé sur banc d'essai Kundt2 (IRPHE) constitué de 2 tubes rectangulaires instrumentés (systèmes de microphones pariétaux et micro-ogives en conduit, sources acoustiques, accès optiques) entre lesquels le traitement MG-COIL/IMC sera inséré. Branché sur la soufflerie S6 (IRPHE), Kundt2 permettra la mesure par méthode multi-sources de la matrice de diffusion acoustique et de l'atténuation acoustique du traitement jusqu'à Mach 0.3. Une mesure peu intrusive du gradient axial de pression acoustique le long de MG-COIL/IMC sera réalisée par une antenne linéaire de 8 microphones dédiée à la mesure aéro-acoustique pariétale sous couche limite. Le coefficient de frottement sera mesuré par anémomètre fil chaud déporté à partir

3

du gradient de vitesse horizontale dans la portion linéaire de la sous-couche visqueuse. Des mesures par vélocimétrie laser par images de particules [18] permettront de visualiser l'évolution de la structure spatiale de l'écoulement le long de MG-COIL avec ou sans IMC. Comparaison et affinage des modèles aéro-acoustiques 1.2 et 1.3. [T0+9 → T0+18]

Retombées attendues

Les retombées scientifiques permettront une compréhension des mécanismes aéro-acoustiques intervenant dans l'atténuation large-bande d'ondes acoustiques basses fréquences par un traitement architectural compact muni d'une interface innovante, acoustiquement neutre et de faible traînée. Les résultats seront publiés dans des revues liées à l'acoustique (Journal of Sound and Vibration-JSV), à la physique des métamatériaux (Applied Physics Letters), dans le rapport annuel CEAS-ASC « Aeroacoustics Highlights » édité au JSV par le Comité Européen des Spécialistes en Aéro-acoustique et dans les actes Springer du prochain symposium international FLINOVIA (Flow-Induced Noise and Vibration Issues). Le projet vise un TRL3 et répond aux besoins de technologies en rupture, émises notamment par les avionneurs (Airbus) et motoristes (Safran Aircraft Engines). La participation à des conférences scientifiques (183rd ASA Meeting, 2022), industrielles (Internoise 2023) et spécialisées (29th AIAA Conference in Aeronautics) s'avère opportune pour de futures collaborations et exploitations industrielles des résultats. Ce projet IMI sera préparatoire à l'étude et caractérisation sur banc d'essai de métamatériaux et interfaces liés à l'effet du ralentissement des ondes sonores sur l'agglomération de particules fines. Cette stratégie vise la réduction de la pollution sonore et atmosphérique. Elle s'inscrit dans les lignes directrices du Pacte Vert Européen pour 2030. Elle serait préparatoire au dépôt de projets structurants impliquant des collaborations académiques internationales et industrielles au sein d'Horizon Europe : projets RIA 2023 – Research, Innovation & Actions et l'intégration d'un Doctoral Network dans le cadre des actions Marie Skłodowska-Curie.

Références

- [1] Mercat F., Nacelle acoustic liners design and integration in aircraft environment - AIRBUS, DOCCLA e-Workshop : Design de Matériaux Absorbants Acoustiques Aéronautiques, ONERA Toulouse, June 2021.
- [2] ACARE (Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe), Time for Change: The need to rethink Europe's FlightPath 2050, 2020. <https://www.acare4europe.org/documents/time-change-rethinking-flightpath-2050>
- [3] Guo Y., Allam S. and Åbom M., Micro-perforated Plates for Vehicle Application, Proceedings of Inter-Noise 2008, Shanghai, China.
- [4] Czwiolong F., Floss S., Kaltenbacher M. and Becker S., Influence of a micro-perforated duct absorber on sound emission and performance of axial fans, Applied Acoustics 174, 107746 (2021).
- [5] Craster R. V. and Guenneau S. (Eds.), Acoustic Metamaterials, Springer Series in Materials Science, 2013.
- [6] Cummer S. A., Christensen J. and Alu A., Controlling sound with acoustic metamaterials, Nature Reviews Materials 1, 16001 (2016).
- [7] Palma G., Mao H., Burghignoli L., Göransson P. and Iemma U., Acoustic Metamaterials in Aeronautics, Applied Sciences 8, 971 (2018).
- [8] Norris A., Acoustic cloaking theory, Proceedings of the Royal Society A 464, 2411-2434 (2008).
- [9] Huang X., Zhong S. and Liu X., Acoustic invisibility in turbulent fluids by optimized cloaking, Journal of Fluid Mechanics 749, 460-477 (2014).
- [10] Liu Z., Zhang X., Mao Y., Zhu Y., Yang Z., Chan C. T. and Sheng P., Locally resonant sonic materials, Science 289 (5485) 1734 – 1736 (2000).
- [11] Pires F. A., Claeys C., Deckers E. and Desmet W., The impact of resonant additions' footprint on the stop band behavior of 1D locally resonant metamaterial realizations, Journal of Sound and Vibration 491 115705 (2021).
- [12] Bravo T. and Maury C., Sound attenuation in a flow duct periodically loaded with micro-perforated patches backed by Helmholtz resonators, Proceedings of the 2018 ASME Inter-Noise Conference, Chicago, USA.
- [13] Ghaffarivardavagh R., Nikolajczyk J., Anderson S. and Zhang X., Ultra-open acoustic metamaterial silencer based on Fano-line interference, Physical Review B 99, 024302 (2019).
- [14] Dai X. and Aurégan Y., A cavity-by-cavity description of the aeroacoustic instability over a liner with a grazing flow, Journal of Fluid Mechanics 852, 126-145 (2018).
- [15] D'Elia M. E., Humbert T. and Aurégan Y., Effect of flow on an array of Helmholtz resonators: Is Kevlar a "magic layer"? Journal of the Acoustical society of America 148(6) 3392 (2020).
- [16] Maury C. and Bravo T., Wideband sound absorption and transmission through micro-capillary plates: Modelling and experimental validation, Journal of Sound and Vibration 478 115356 (2020).
- [17] Pelat A., Gautier F. Conlon S. C. and Semperlotti F., The acoustic black hole: A review of theory and applications, Journal of Sound and Vibration 476 115316 (2020).
- [18] Felis-Carrasco F., Tomas S., Vallet A., Amielh M. and Anselmet F., Experimental analysis of the flow characteristics of a pressure-atomized spray, International Journal of Heat and Fluid Flows 85, 108624 (2020).